УДК 004.942

Ю.И. Нечаев[1]***, А.В. Лютин***[2]
[1]Институт высокопроизводительных вычислений и информационных систем,
[2]Государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия
int@csa.ru

Интеллектуальная система, функционирующая на основе мультиагентных технологий

Обсуждаются особенности реализации бортовой интеллектуальной системы контроля динамики судна на основе мультиагентных технологий. Основное внимание уделяется формализации процедур функционирования ИС в различных условиях эксплуатации, в том числе и в экстремальных ситуациях. Мультиагентная система рассматривается в качестве конкурирующей технологии, обеспечивающей повышение эффективности контроля и принятие решений.

Введение

Разработка и испытание бортовых интеллектуальных систем (ИС) представляют собой одно из перспективных направлений повышения эффективности контроля динамических ситуаций, возникающих в практике эксплуатации судов и плавучих технических средств освоения океана. Исследования в области архитектурно-структурной организации бортовых ИС показывают, что в качестве эффективных моделей такой организации можно рассматривать мультиагентные системы (МАС) [1-20]. Эти системы представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития распределенных компьютерных систем с высоким уровнем искусственного интеллекта. На рис. 1 приведена схема контроля поведения судна как сложного динамического объекта (ДО).

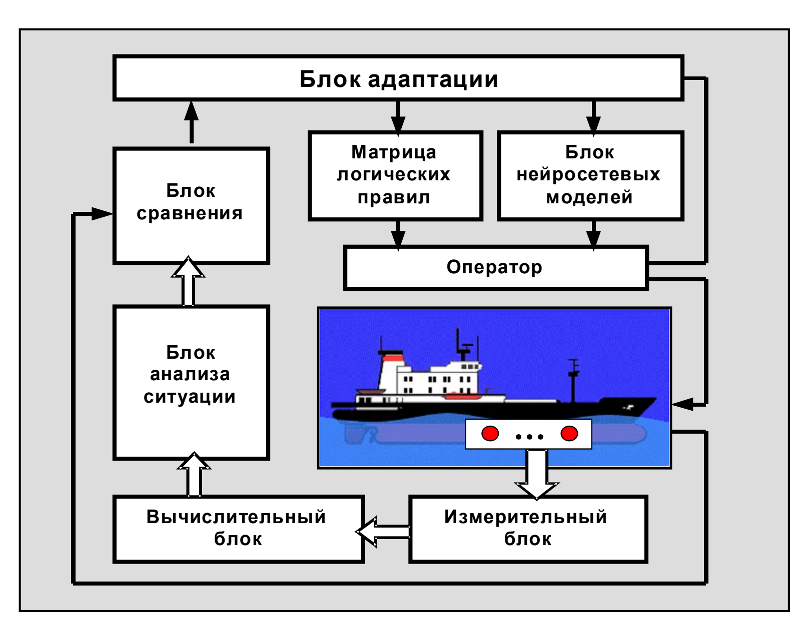


Рисунок 1 – Поток информации при контроле поведения ДО в штормовых условиях

Схема определяет контроль поведения ДО в рамках принципа конкуренции, позволяющего выбирать предпочтительную вычислительную технологию обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [11], [12].

Архитектурно-структурная организация ИС на основе концепции МАС позволяет обеспечить новые качественные признаки, повышающие эффективность функционирования системы в сложных (особенно в нештатных и экстремальных) ситуациях за счет использования следующих преимуществ [3-6], [9], [10], [14-16], [19]:

– параллелизм обработки информации на основе сообщества агентов;
– уменьшение объема передаваемой информации (отдельным агентам передаются высокоуровневые частичные решения);
– гибкость, обеспечивающая возможность использования агентов различной мощности при совместном решении поставленной задачи;
– повышение надежности системы путем передачи функций между агентами.

В настоящей статье предлагается подход к архитектурно-структурной организации МАС, ориентированной на решение задач анализа и прогноза развития текущих ситуаций на основе измерительной информации [2], [11-13].

1. Особенности представления исходной информации

Исходная информация для функционирования МАС представляется в виде дерева типовых процедур, обеспечивающих реализацию потока информации в системе «динамический объект – внешняя среда» (рис. 2).

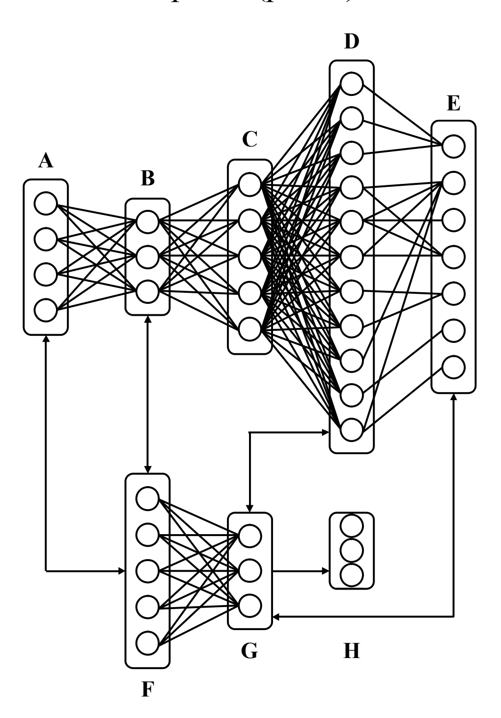


Рисунок 2 – Дерево типовых процедур

Соответствующие укрупненные процедуры обработки информации и принятия решений при контроле динамики объекта содержатся в табл. 1.

Приведенные на рис. 2 и в табл. 1 процедуры обработки информации позволяют реализовать концепцию МАС как коллективное поведение интеллектуальных агентов при контроле и прогнозировании сложных ситуаций [10].

Таблица 1 – Элементы структуры типовых процедур обработки информации и характеристика задач анализа и прогноза развития нештатных и экстремальных ситуаций

Структура	Характеристика
(A-1) – (A-4)	Функции измерительной системы
(B-1) – (B-3)	Обработка данных измерений
(C-1) – (C-5)	Оценка текущей ситуации
(D-1) – (D-11)	Экстремальные ситуации
(E-1) – (E-7)	Процедуры принятия решений
(F-1) – (F-5)	Прогноз экстремальных ситуаций
(G-1) – (G-3)	Моделирование ситуаций
(H-1) – (H-3)	Визуализация ситуаций

2. Формальное описание интеллектуального агента

Архитектурное решение представления интеллектуального агента рассмотрено на рис. 3. Такое решение является типичным для классической модели МАС, используемой в задачах принятия решений при контроле сложных ДО и систем [2-10], [14-16].

Реализацию представленной архитектуры можно рассматривать как звено нижнего уровня многоуровневой МАС. Верхний уровень (метауровень) обеспечивает координацию функционирования всей МАС на основе глобальной стратегии решения общей задачи контроля динамики судна как сложного объекта.

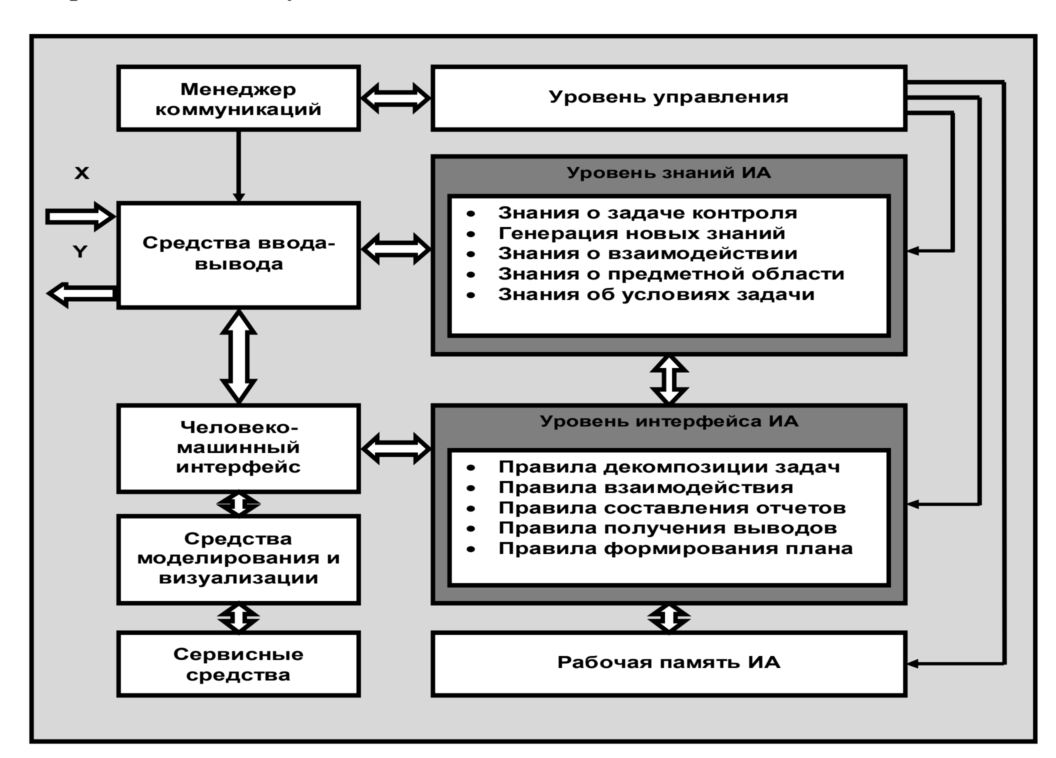


Рисунок 3 – Архитектура интеллектуального агента бортовой ИС

Как следует из рис. 3, особенностью ИА как элемента сложной системы является многоуровневое представление знаний:

– уровень знаний о предметной области динамики судна на волнении;

– уровень знаний об условиях решения задачи контроля и прогнозирования;
– уровень генерации новых знаний на основе адаптивной компоненты.

Формальная модель архитектуры агента представляется в следующем виде [5]:

$$Ag = \langle shm\ P, M \rangle, \quad (1)$$

где shmP = <B, C. D> – понятия агента; B = {Bi}, I = 1, …, n – множество имен признаков объекта; C = {Cj), j = 1, …, m – множество признаков, обеспечивающих связь между понятиями; D = {Dk}, k = 1, …r – множество признаков, характеризующих понятие; структура M = <R, N> – множество методов, реализующих преобразование входных атрибутов в выходные.

Используемые в (1) методы включают множество подходов, методов и моделей обработки информации, связанных в семантическую сеть (рис. 4), с помощью которой определяется структура интерпретации знаний.

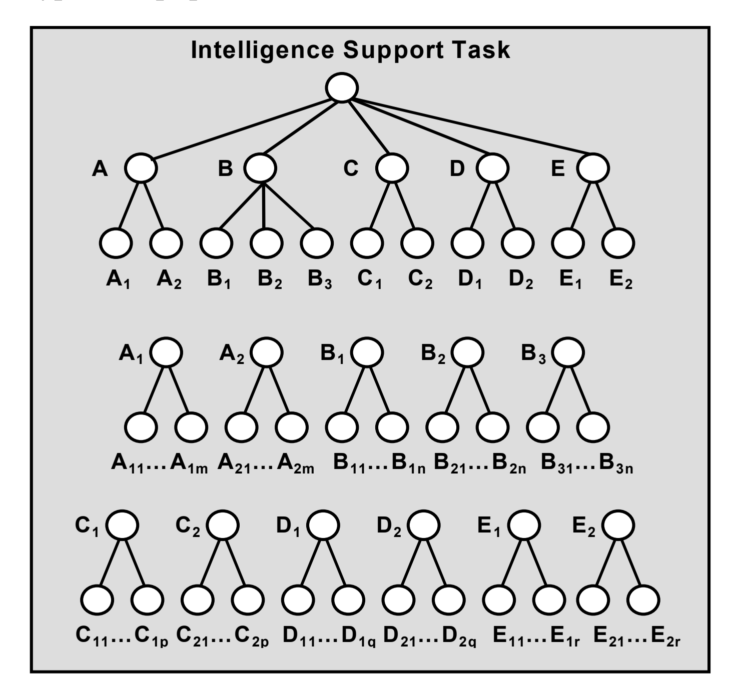


Рисунок 4 – Семантическая сеть задач интеллектуальной поддержки решений: A – анализ альтернатив в нечеткой среде; B – выявление «скрытых» закономерностей; C – поиск физических эффектов; D – многокритериальная оптимизация; E – обработка результатов эксперимента; A_1 – подход Беллмана – Заде; A_2 – Метод Саати; B_1 – статистические модели; B_2 – формальный концептуальный анализ; B_3 – нейросетевые модели; C_1 – онтологии; C_2 – нейросетевые модели; D_1 – модели оптимизации решений; D_2 – модели, описывающие критериальный базис; E_1 – модели планирования эксперимента и оценки адекватности его результатов; E_2 – модели аппроксимации, идентификации и прогноза, а также визуализации результатов эксперимента.

3. Логический вывод в рамках принципа конкуренции

Рассмотрим формальную постановку задачи организации функционирования динамической базы знаний бортовой ИС. Пусть Y_i (i = 1, …, m) – множество классов задач интеллектуальной поддержки оператора. Каждому классу Y_i соответствует вектор признаков Aj (j = 1, …, n_m) – условий, определяющих особенности задач данного класса. Условия разделяются на *основные* A_{jB} (JB = 1, …, k) и *дополнительные* A_{jC} (JC = k + 1, …, q).

Решение задачи анализа и прогноза текущей ситуации ведется в предположении независимости признаков на основе принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [11-13].

Общая структура *исходной информации* при разработке и функционировании МАС формируется на основе семантической сети (рис. 4), с помощью которой дается описание рассматриваемых задач интеллектуальной поддержки оператора ИС и методов их решения. Эта информация представляет собой интегрированное поле знаний, характеризуемых вектором

$$X = X_A \cup X_K \cup X_S \,, \qquad (2)$$

где X_A – общие данные о задаче, X_K – результаты, которые можно получить на основе ее анализа, X_S – данные, специфичные для каждой задачи и результатов ее анализа.

Вектор (2) описывает данные, поступающие на вход *логической системы*, осуществляющей процедуру вывода на основе классической и нечеткой систем знаний [1].

В зависимости от особенностей рассматриваемого приложения используются два основных типа задач анализа и интерпретации информации в бортовой ИС:

– первый тип задач включает подходы и парадигмы, основанные на использовании моделей интеллектуальной поддержки оператора на основе конкурирующих вычислительных технологий;

– второй тип задач относится к реализации средств интеллектуальной поддержки оператора при проведении натурных испытаний ВС на борту ДО. Здесь основную роль играют методы представления, использования и модификации знаний.

Логический вывод при поиске моделей интеллектуальной поддержки состоит из последовательности шагов:

– *на первом шаге* на основе текущей информации производится отбор подходящих классов моделей. Критерием отбора служат условия задачи и диапазоны изменения заданных характеристик;

– *на втором шаге* для выделенных классов моделей рассчитываются значения экспертных оценок, устанавливается конкретная модель и соответствующие признаки;

– *третий шаг* – вывод заключения с формулировкой характеристики модели, ее пригодности для решения поставленной задачи и диапазона погрешностей, который устанавливается на основе критериев, определяющих интервальные значения экспертных оценок.

Правила вывода формализуются с использованием продукционных моделей «if – then», имеющих следующую структуру [11], [13]:

$$\begin{gathered} R_1: \text{«if } X_{11} \text{ is } A_{11} \& \; X_{21} \text{ is } A1_{21} \&, \ldots, \& X_{ni1} \text{ is } A_{ni1}, \text{ then } Y_1\text{»;} \\ \ldots \\ R_m: \text{«if } X_{1m} \text{ is } A_{1m} \& \; X_{2m} \text{ is } A_{2m} \&, \ldots, \& X_{nim} \text{ is } A_{nim}, \text{ then } Y_m\text{».} \end{gathered} \qquad (3)$$

Здесь R_i ($i = 1, \ldots, m$) – правило продукции; X_{ij} – входные данные (признаки); A_{ij} – информация о признаках задачи; Y_i – выходные данные, которые формулируются как *класс задачи*. При документировании результатов на экран также выводится *перечень признаков*, наличие которых определяет установленную задачу.

При формализации базы знаний бортовой ИС на основе нечеткой информации используется модификация логического вывода с помощью композиционной модели Л. Заде [7] и выполнения процедуры импликации по Мамдани [1], [13]. Разработанная база знаний позволяет обеспечить контроль и прогноз развития ситуации в динамически меняющейся среде [12], [13]. Адаптивная компонента реализует особенности функционирования ИС в сложных условиях, когда взаимодействие ДО с внешней средой характеризуется значительной неопределенностью.

4. Организация мультиагентной системы контроля функционирования динамического объекта

Совокупность интеллектуальных агентов образует МАС с распределением общего решения задачи контроля поведения ДО между агентами. При контроле ситуаций и прогнозировании их развития используются древовидные структуры. Типы задач, решаемых МАС, образуют дерево целей (рис. 5) и дерево критериев (рис. 6).

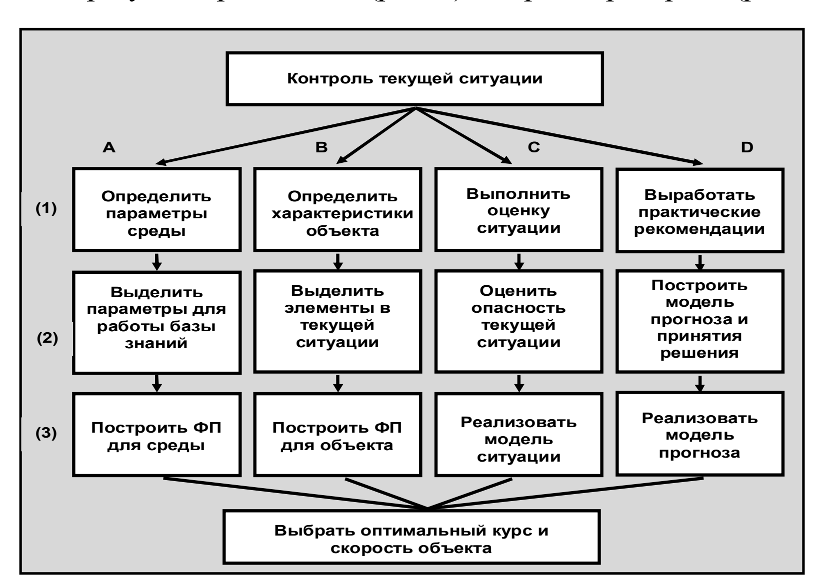


Рисунок 5 – Дерево целей при решении задач контроля и прогноза ситуаций

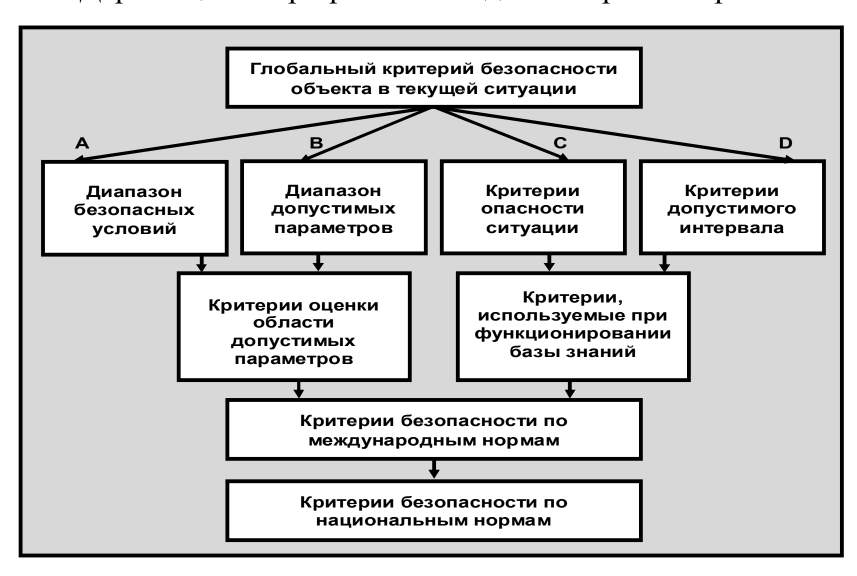


Рисунок 6 – Дерево критериев оценки решения

С учетом этих особенностей можно представить следующую интерпретацию интеллектуального агента, основанную на стандартных моделях МАС [3], [4]:

$$Ag = \langle m_A, C_A, S_A, X, Y, L \rangle, \qquad (4)$$

где $m_A \in A$ – модель среды агента (знание агента о среде); M – набор моделей сред; $C_A \in Q$ – цель агента в составе набора Q; $S_A \in S$ – стратегия функционирования агента; S – набор стратегий; X – операция выполнения агентом стратегии S_A; Y – операция «наблюдения» агентом для восприятия среды; L – операция адаптации (обучения) агента.

Среда функционирования агента представляется в виде [3], [4], [6], [9]:

$$E_A = <E_S, Ag(MAC), C(MAC)>, \quad (5)$$

где $E_S = <R_S, T>$ – жизненное пространство агента в системе; Ag(MAC) – набор агентов, образующий конфигурацию агентов в МАС; С(МАС) – соединение между агентами и пространством E_S; R_S – ресурсы для реализации пространства E_S в рамках мультипроцессорной системы; Т – топология жизненного пространства интеллектуального агента, определяемая алгоритмами обработки измерительной информации и совокупностью нештатных и экстремальных ситуаций.

Каждый интеллектуальный агент может быть ориентирован на решение конкретной подзадачи, определяемой деревом целей. Взаимодействия между агентами будут насыщены во времени и многообразны по содержанию. При этом возможны случаи, когда один агент реализует две и более взаимосвязанных задач.

Результат достижения цели для выделенных уровней интерпретации информации для каждого агента оценивается соответствующим комплексным критерием [1]:

$$(KR)_C = \{K_{ij,}\}, \quad (6)$$

где $i = 1, \ldots, I_C$ и $j = 1,\ldots, J_C$ – качественные и количественные параметры дерева критериев, соответствующих дереву целей решения комплексной задачи анализа обработки информации при функционировании МАС.

Функционирование ИС с использованием технологии МАС осуществляется на основе динамической базы знаний, обеспечивающей анализ и прогноз развития различных (в том числе нештатных и экстремальных) ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации ДО. Методы и модели, положенные в основу обработки информации, позволяют исследовать динамические процессы в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. В этих условиях при построении математической модели реального процесса приходится прибегать к определенным упрощениям.

Таким образом, векторное поле, входящее в правую часть динамических уравнений, всегда будет известно с определенной степенью точности, т.е. в пределах малой окрестности функционального пространства [7].

Ассоциации агентов образуют МАС (рис. 7), которая может быть представлена в виде следующего описания [4], [6]:

$$MAC = <N(S), Ag, E, P(S)>, \quad (7)$$

N(S) – наименование системы, $Ag \in Ag(S)$ – набор всех конфигураций агентов МАС; $E \in E_S$ – совокупность всех жизненных пространств; P(S) – общесистемные характеристики МАС.

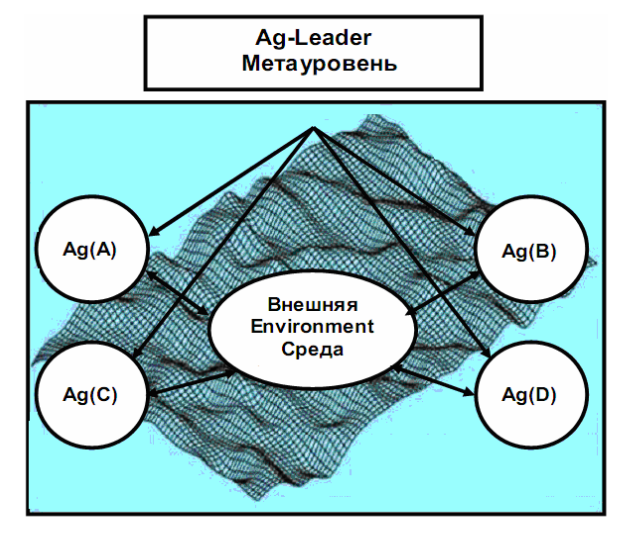


Рисунок 7 – Схема МАС, обеспечивающая контроль динамики сложного объекта

При реализации концепции МАС большое внимание уделяется построению жизненного пространства для отдельных агентов и для ИС в целом. Наибольший интерес представляют состав и структура базы данных и динамической базы знаний, особенно их содержательное наполнение в процессе функционирования системы в различных условиях эксплуатации. Соответствующие среды предусмотрены для хранения алгоритмов решения задач, дерева целей и дерева критериев.

Разработанная МАС содержит уникальные механизмы обработки информации в сложных динамических средах, характерных для функционирования бортовой ИС. Предложенная архитектура и схема организации МАС позволяют получить важные преимущества при функционировании в условиях неопределенности и неполноты исходной информации [1], [7]:

– параллелизм обработки информации разными агентами;
– уменьшение объема передаваемой информации за счет передачи высокоуровневых решений;
– гибкость и повышенная надежность системы.

Новые качественные признаки ИС, построенной на основе концепции МАС, позволяют обеспечить совместное решение сложных задач анализа и прогноза динамики судна, а также и возможность передачи решающих функций между агентами в случае возникающих затруднений в сложных ситуациях. Это повышает оперативность и обоснованность принимаемых решений при обеспечении высокой достоверности и актуальности информации, предоставляемой оператору для принятия решений.

5. Программная реализация мультиагентной системы

Концепция разработки ИС на основе конкурирующих вычислительных технологий предусматривает использование многоуровневых моделей, определяющих принцип организации мультипроцессорной интегрированной вычислительной среды. Верхний уровень представлен управляющей ЭВМ, осуществляющей связь с подсистемами, ввод информации с внешних устройств и трансляцию с языков высокого уровня. Нижний уровень состоит из множества параллельно действующих процессоров, обеспечивающих решение отдельных функциональных задач МАС в соответствии с загрузкой, определяемой управляющей ЭВМ.

Ускорению вычислений способствует использование принципов распараллеливания и конвейеризации исследуемых задач. Фундаментальным понятием параллельной обработки информации является взаимосвязь правил, определяющих логический вывод и принятие решений. При разработке системы реализуются принципы «открытости» и «прозрачности». Принцип «открытости» связывают с понятием открытых систем, т.е. систем, способных к коммутации в неоднородной среде. Решения по программному обеспечению открытых систем отвечают требованиям мобильности, совместимости, гибкости и широте охвата аппаратных платформ [6].

Одно из важных направлений в создании программно-аппаратных средств интеллектуальной поддержки оператора ИС – аппаратурная и информационная интеграция и создание единой вычислительной среды и общих элементов для всех информационных каналов. В результате чего обеспечивается реконфигурация не только на уровне разделенной вычислительной системы МАС, но и на уровне информационных каналов с интеллектуальной логикой. Рассматриваемую технологию интеллектуальной поддержки обеспечивает развивающаяся архитектура «клиент – сервер» с разделением логики приложений. Такая архитектура реализуется путем использования «активного сервера базы данных», в основе которого выделяют:

– хранимые процедуры с операторами SQL для доступа к базе данных, с помощью которых на сервере выполняются общие алгоритмы обработки информации;
– логические модели (правила), с помощью которых производится обработка информации в ситуациях при любых изменениях в базе данных.

При функционировании системы интеллектуальной поддержки часть прикладной логики реализуется на клиенте, а основная часть – на сервере базы данных. Используемые в системе процедуры и логические правила обеспечивают обработку информации в темпе ее поступления. Концептуальная модель такой системы представляет собой ряд взаимосвязанных компонент [17]:
– развивающееся множество решаемых задач и топология системы, представленная в виде сети;
– отображения, описывающие распределение этих задач и взаимодействий между пользователями;
– область функциональной надежности на множестве состояний сетевого оборудования;
– множество маршрутов, по которым перемещаются исходные данные и результаты вычислений в процессе выполнения задач для различных конструкторских приложений.

Задача указанных компонент состоит в обеспечении управления распределенными ресурсами в режиме реального времени. Функциональный анализ рассматриваемой системы позволяет представить на момент времени t_0 разработки проекта полное множество задач, возникающих в процессе проектирования в виде следующего соотношения:

$$C(t_0) = \bigcup_{P(t_0)} C_i\left(\forall\left(i_1, i_2\right) \in P\right) \wedge \left(C_{i1}, C_{i2}\right), \qquad (8)$$

где $p(t_0)$ – множество конструкторов (пользователей); $C(t_0)$ – множество их функций $C(t_0)$, т.е. полное множество конструкторских задач $C(t_0)$ естественным образом разбивается на классы в соответствии с их пользователями.

Заключение

Проведенный анализ процедур последовательности обработки информации при принятии решений по контролю динамики судна в условиях эксплуатации позволил сформулировать следующие результаты исследования:

1. Формализовать поток информации и разработать архитектуру МАС как систему параллельного действия, обеспечивающую оперативный контроль и принятие решений на основе данных динамических измерений.

2. Определить исходный базис для построения жизненного цикла пространства МАС при функционировании ИС в рамках принципа конкуренции на основе данных динамических измерений.

3. Реализовать ассоциацию агентов и их функции в соответствии с деревом целей и деревом критериев, разработанных на основе международной и национальной системы критериальных соотношений.

Литература

1. Аверкин А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / [Аверкин А.Н., Батыршин А.Н., Блишун А.Ф. и др.] ; под ред. Д.А. Поспелова. – М. : Наука, 1986.
2. Александров В.Л. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / [В.Л. Александров, А.П. Матлах, Ю.И. Нечаев и др.]. – Санкт-Петербург : ГМТУ, 2001.
3. Городецкий В.И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения / В.И. Городецкий // Новости искусственного интеллекта. – 1996. – № 1. – С. 44-59.

4. Городецкий В.И. Многоагентные системы (обзор) / В.И. Городецкий, М.С. Грушинский, А.В. Хабалов // Новости искусственного интеллекта. – 1997. – № 1. – С. 12-47.
5. Евгенев Г.Б. Мультиагентные системы компьютеризации инженерной деятельности / Г.Б. Евгенев // Информационные технологии. – 2000. – № 3. – С. 2-7.
6. Евгенев Г.Б. Интеграция прикладных систем на основе баз знаний / Г.Б. Евгенев // Программные продукты и системы. – 2005. – № 3. – С. 42-46.
7. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976.
8. Ириков В.А. Распределенные системы принятия решений. Теория и приложения / В.А. Ириков, В.Н. Тренев. – М. : Наука. Физматгиз, 1999.
9. Коваль В.Н. О проблеме интеллектуализации интегрированных систем информационной поддержки решения задач в области СВТ / В.Н. Коваль, Ю.С. Яковаенко // Искусственный интеллект. – 2000. – № 3. – С. 60-71.
10. Нечаев Ю.И. Искусственный интеллект: концепции и приложения / Нечаев Ю.И. – Санкт-Петербург: ГМТУ, 2002.
11. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени / Ю.И. Нечаев // Лекции по нейроинформатике. Часть 2 : Труды 5-й Всероссийской конференции «Нейроинформатика-2003». – М. : МИФИ, 2003. – С. 119-179.
12. Нечаев Ю.И. Концептуальные основы создания бортовых интеллектуальных систем. Информационно-измерительные и управляющие системы. Часть. 2 / Ю.И. Нечаев // Корабельные системы. – 2006. – № 9. – С. 39-49.
13. Нечаев Ю.И. Нейронечеткая система поддержки принятия решений при оценке поведения сложного динамического объекта / Ю.И. Нечаев // Труды X-й Всероссийской конференции «Нейроинформатика-2003». – М. : МИФИ, 2003. – С. 97-164.
14. Поспелов Д.А. Многоагентные системы – настоящее и будущее // Информационные и вычислительные системы / Д.А. Поспелов. – 1998.
15. Тарасов В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте / В.Б. Тарасов // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2.
16. Филатов В.А. Модель мультиагентной системы автономного администрирования информационных систем и распределенных баз данных / В.А. Филатов, Е.Е. Цыбульник, Л.Э. Чалая // Новости искусственного интеллекта. – 2002. – № 4. – С. 620-627.
17. Царегородцев А.В. Синтез развивающихся информационно-управляющих систем / А.В. Царегородцев, И.Н. Мухин // Автоматизация и современные технологии. – 2005. – № 3. – С. 22-26.
18. Winston P.N. Artificial intelligence / P.N. Winston. – Addison Wesley Publishing Company, 1993.
19. Wooldridge M. Intelligent agents: Theory and practice / M. Wooldridge, N. Jennings // The knowledge Engineering Review. – 1995. – № 10 (2). – P. 115-152.
20. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on the ASM-1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.

Ю.І. Нечаєв, А.В. Лютін

Інтелектуальна система, що функціонує на основі мультиагентних технологій

У статті обговорюються особливості реалізації бортової інтелектуальної системи контролю динаміки судна на основі мультиагентних технологій. Основна увага приділяється формалізації процедур функціонування ІС у різноманітних умовах експлуатації, у тому числі й у екстремальних ситуаціях. Мультиагентна система розглядається як конкуруюча технологія, що забезпечує підвищення ефективності контролю та прийняття рішень.

Yu.I. Nechaev, A.B Lyutin

The Intelligence System Functionated on the Basis of the Multiagent Technologies

The features of realization of the multiagent approach are discussed at construction of the onboard intelligence system (IS) of ship dynamics. The basic attention is given to formalization of procedures of IS functioning in various conditions of operation, including in extreme situations. Used the multiagent system is considered as competing technology ensuring increase of efficiency of the control and acceptance of the decisions.

Статья поступила в редакцию 25.05.2009.